

引用格式: 戚美,王立夫,陈庆光,等. 坝型结构喷嘴自激振荡脉冲空化射流的数值模拟[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(6):108-116.

QI Mei, WANG Lifu, CHEN Qingguang, et al. Numerical simulation of self-excited oscillating pulsed cavitation jet of holed wind instrument type nozzle[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(6): 108-116.

# 坝型结构喷嘴自激振荡脉冲空化射流的数值模拟

戚美,王立夫,陈庆光,张永超,赵见龙,鞠永恒

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**为研究自激振荡脉冲空化喷嘴空化性能,采用流体仿真分析平台 Fluent,以 Helmholtz 喷嘴原型构建一种具有坝型结构的喷嘴模型,同时基于自激振荡脉冲空化喷嘴的空化效应与多相流模型,数值模拟其在 100 ms 振荡时间内的空化情况,并与 Helmholtz 喷嘴空化效果进行对比。并分别改变坝型结构喷嘴上下流道的直径比和弧线角度,通过数值模拟考察直径比和弧线角度对喷嘴空化效果的影响。结果表明:上、下流道直径比在 0.5~0.6 空化效果最好;弧线角度  $\theta=50^\circ$  时的坝型结构喷嘴,出口处速度呈现均匀性,同时出口更易形成均匀负压区域,喷嘴腔室内空化呈对称分布,空化效果最佳。

**关键词:**坝型结构喷嘴;空化模型;空化喷嘴;自激振荡脉冲空化射流;数值模拟

中图分类号:TP69

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)06-0108-09

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.06.013

## Numerical Simulation of Self-excited Oscillating Pulsed Cavitation Jet of Holed Wind Instrument Type Nozzle

QI Mei, WANG Lifu, CHEN Qingguang, ZHANG Yongchao, ZHAO Jianlong, JU Yongheng

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong

University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In order to research the cavitation performance of self-excited oscillating pulsed cavitation nozzles, a nozzle model with a holed wind instrument type structure was constructed by using a Helmholtz nozzle prototype based on Fluent. The cavitation of the cavitation nozzle in 100 ms was numerically simulated based on the effect of the self-excited oscillating pulsed cavitation nozzles and multi-phase flow model. Then it was compared with the Helmholtz nozzle for cavitation effects. The diameter ratio and the arc angle of the upper and lower runners of the holed wind instrument type structure nozzles were changed respectively to investigate their influences on the cavitation effect of the nozzles by numerical simulation. The results show that the cavitation effect is the best when the diameter ratio of the upper and lower flow runners is between 0.5 and 0.6. When the arc angle is  $\theta=50^\circ$ , the velocity distribution is more uniform at and the uniform negative pressure region is easier to be formed at the nozzle exit. The cavitation in the nozzle chamber is symmetrically distributed and hence the best cavitation performance may be obtained.

**Key words:** holed wind instrument type nozzle; cavitation model; cavitation nozzle; self-excited oscillating pulsed cavitation jet; numerical simulation

收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51674156)

作者简介:戚美(1969—),女,山东泰安人,副教授,主要从事数值方法的理论及应用、设备节能减排技术研究。

E-mail:1187598383@qq.com

自激振荡脉冲空化射流技术是一种高效节能简便的新型水射流技术,广泛应用于油罐底泥清洗、船体清洗等方面。空化是指液体中局部压强小于饱和蒸气压时诱发液体内部空泡产生、发展和溃灭的过程,由于空化气泡在溃灭的瞬间释放大量能量,利用该能量可以实现对液体流动的强化,达到增效、节能和降耗的效果<sup>[1]</sup>。研究表明,当高速射流在进入狭窄的喷嘴内部时往往伴随着复杂的湍流运动和介质密度的变化,极易在喷嘴内部形成空化现象。但是空化现象的形成机理极其复杂,空泡的溃灭以及射流的不稳定性都是影响空化射流的关键因素,Alehossein等<sup>[2]</sup>通过求解 Rayleigh-Plesset 方程模拟了空化射流中空泡的生长、发展和溃灭的变化过程,得出空泡影响空化射流形成的结论。Chen等<sup>[3]</sup>利用数值模拟证实了空化射流能对钢铁产生腐蚀的原因是因为空泡在溃灭的瞬间可以产生强大的冲击波与瞬间的高温高压。李江云等<sup>[4]</sup>提出一种可适用于高速剪切流的非定常空化模型,并根据能量平衡条件,给出了新的空化判别标准。Wang等<sup>[5]</sup>结合拉格朗日方法与欧拉方法的优点提出了混合计算模型,提高了空化模型模拟的计算精度。李根生等<sup>[6]</sup>在风琴管谐振器的基础上研究出自振空化喷嘴,并将其应用到石油钻井钻头上,经实验证实,自振钻头与普通钻头相比钻速具有明显的提高。Johnson等<sup>[7]</sup>针对锥形喷嘴在淹没条件下的试验结果表明,圆锥收敛角为 $60^\circ$ 及圆柱平行段为 $0.5D$ 的喷嘴冲蚀效果最佳。汪志明等<sup>[8]</sup>利用流体的瞬变流原理和自激振荡相联合的方式,构造出适用于流体的水声学特征方程,并通过实验验证了该方程的可靠性。唐川林等<sup>[9]</sup>基于水声学及动力学原理,建立了自激振荡腔内的脉冲射流频率模型,并指出模态数 $N$ 、流体密度 $\rho$ 及密度变化率是影响自激振荡脉冲射流频率的几个重要因素。Akira等<sup>[10]</sup>通过 PIV 实验研究了不同雷诺数和空化数下空化效应对液体射流液滴破碎的影响。刘建军等<sup>[11]</sup>为研究低温低压特殊环境下轻油燃烧器的火焰结构特性,运用燃烧学和喷雾学原理,以标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、离散坐标辐射模型和平衡混合分数模型为燃烧单元本构模型,建立了具有圆筒形燃烧室的物理模型并进行计算分析。结果表明,当环境温度为 $273\text{ K}$ ,环境压力为 $0.1\text{ MPa}$ 时,在不同截面处,燃烧室内的温度随着与燃烧头距离的增加而逐渐增大,截面处最高温度出现在火焰中心或边缘处;火焰最高温度随着外界温度、压力的降低而减小;火焰长度随着环境压力与温度的降低而增大。聂文等<sup>[12]</sup>为了确定风流影响雾滴与尘粒耦合沉降的规律,分析了雾滴与尘粒耦合沉降机理,并自主设计实验装置进行了风流影响雾滴与尘粒耦合沉降实验。由实验结果可知:随着风流速度的增大,喷雾场雾滴粒径平均值整体呈增大趋势,喷雾场上风侧的雾滴粒径一般小于下风侧,测点处雾滴的粒径增大值及增大率均不断减小,喷雾场对全尘、呼尘的降尘率分别由风速为 $0.5\text{ m/s}$ 时的 $49.3\%$ 和 $47.5\%$ 降至风速为 $1.5\text{ m/s}$ 时的 $42.7\%$ 和 $39.2\%$ 。研究表明:风流速度越大,越不利于雾滴耦合沉降尘粒、尤其小粒径尘粒。

大涡模拟(large eddy simulation, LES)是近年来在计算流体力学领域发展起来的一种重要的数值模拟方法,是最具有潜力的湍流数值模拟发展方向。本研究中喷嘴腔室内部流体流态为湍流流态,因此采用 LES 方法,以传统清洗空化喷嘴 Helmholtz 喷嘴为参考对象,建立新型坝型结构喷嘴,并数值模拟坝型结构喷嘴的空化特性,分析坝型结构喷嘴在一个空化振荡周期内的变化情况,同时探究坝型结构喷嘴上下流道在不同直径比和不同弧线角度时对坝型结构喷嘴空化特性的影响。

## 1 对坝型结构喷嘴的数值模拟

### 1.1 喷嘴物理模型

基于自激振荡脉冲空化效应的坝型结构喷嘴腔室,建立如图1所示坝型喷嘴模型,图2为其二维示意图。其中 $D_1$ 、 $D_2$ 分别为上、下流道直径,分别取 $8$ 和 $15\text{ mm}$ ;  $B_1$ 、 $B_2$ 分别为上、下流道长度,均取 $20\text{ mm}$ ;  $\theta$ 为坝型喷嘴壁面的弧形角度,取 $90^\circ$ ,坝型喷嘴总长 $L=100\text{ mm}$ 。

### 1.2 数学模型

用于大涡模拟的流动控制方程包括 Navier-Stokes 方

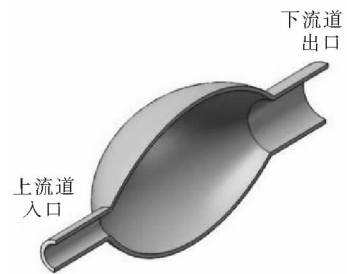


图1 坝型喷嘴模型

程与连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]. \tag{2}$$

对 N-S 方程进行滤波,采用滤波函数将流动变量  $f(x, t)$  分解成大尺度量  $\bar{f}(x, t)$  和小尺度  $f'(x, t)$ ,

$$f(x, t) = \bar{f}(x, t) + f'(x, t), \tag{3}$$

$$\bar{f}(x, t) = \int_D G(x, x') f(x', t) dx'. \tag{4}$$

其中,  $G(x, x')$  为滤波函数,  $D$  为流场区域。

$G(x, x')$  定义为:

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{V}, & x' \in \Omega; \\ 0, & x' \notin \Omega \end{cases}; \tag{5}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \tag{6}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \tag{7}$$

其中,雷诺应力  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$ ,  $\tau_{ij}$  作为未知量,用 Smagorinsky 模式求解。即

$$\tau_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}.$$

其中,  $\mu_t$  为亚网格湍流黏性力,  $\bar{S}_{ij}$  为拉伸率张量。

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}_{ij}|.$$

其中,  $L_s$  为网格混合长度,且有:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{\frac{1}{3}}), \quad |\bar{S}_{ij}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}.$$

其中,  $\kappa$  为 von kármán 常数,  $d$  为到壁面的最近距离,  $V$  为计算单元的体积,  $C_s$  为 Smagorinsky 常数。

### 1.3 空化模型

空化射流的过程涉及相变传质,建立空化模型考虑的关键问题就是质量传输问题,空化传质的建立不是单独的,需要将空化模型作为平衡方程的一部分用来描述蒸汽的产生与破碎。本研究选用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型<sup>[13]</sup>模拟多相流流动或者多相流中的物质传输,该模型假设在液体中气泡具有相同的初始尺寸,以单位体积内的气泡数目计算传质效率为:

$$R = n \left( 4\pi R_B^2 \rho_v \frac{dR_B}{dt} \right). \tag{8}$$

式中,  $n$  为单位体积内的气泡数目;  $R_B$  为气泡直径;  $\rho_v$  为蒸汽密度。

忽略 Rayleigh-Plesset 方程中的二阶项与表面张力项和黏性项,可以得到:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{3\rho_l}}. \tag{9}$$

式中,  $p_B$  为气泡表面压力;  $p$  为非凝结气体部分压力。

将式(9)代入式(8)得到用体积分数表达的传质效率

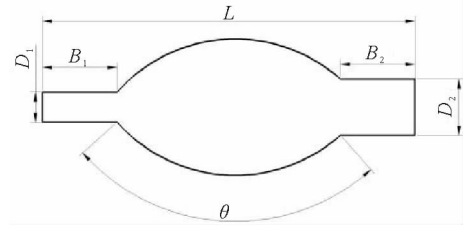


图 2 二维示意图

Fig. 2 2D schematic diagram

$$R = \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{3\rho_1}} \quad (10)$$

通过计算得到气泡传质效率的表达式:

$$R_e = C_e \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)}{R_B} \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_1}} \quad (11)$$

$$R_c = C_c \frac{3\alpha_v}{R_B} \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_1}} \quad (12)$$

其中,  $\alpha_{nuc}$  为气核体积分数;  $C_e$  为蒸发常数项;  $C_c$  为凝结常数项。

### 1.4 数值模拟参数设置

采用 ICEM 软件对喷嘴结构进行网格划分,为了提高计算精度,对喷嘴腔室区域进行网格加密处理,如图 3 所示。利用 FLUENT 软件进行数值模拟。上流道入口设为均匀速度入口,流速为 44 m/s,下流道出口设为压力出口,为 0.1 MPa。液体介质选用常温下的水,蒸汽介质选用水蒸气,饱和蒸气压为 3 540 Pa。数值计算采用 SIMPLEC 算法。

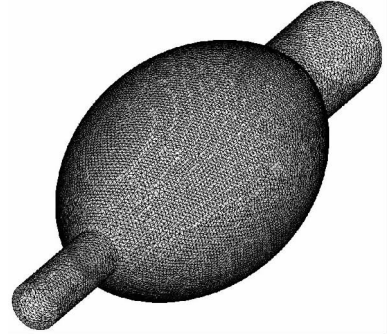


图 3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

### 1.5 坝型结构喷嘴空化过程

根据文献[14]的研究结果,选取自激振荡脉冲喷嘴振荡时间周期为 100 ms,图 4 所示为 100 ms 振荡时间内不同时刻的液相分布情况。

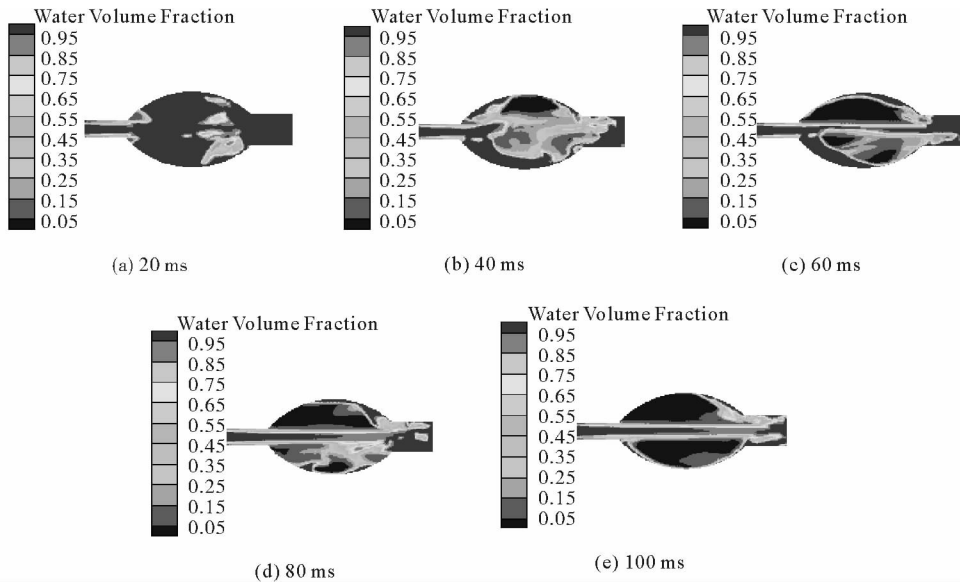


图 4 不同时刻液相分布

Fig. 4 Liquid phase distribution at different times

由图 4 可以看出,空化开始在喷嘴结构收缩处产生,空化现象呈现对称分布。随着时间的推移,受阻的水流产生的空化因喷嘴壁面的碰撞开始有回流,腔室内空化继续发生,回流空化又逐渐成对称式分布,并在出口处也开始发生空化,随着时间的推移空化区域最终整体近似呈对称分布。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 对两种空化喷嘴进行数值模拟

Helmholtz 喷嘴为常用的空化模型,图 5 为 Helmholtz 喷嘴腔室模型。汪朝晖等<sup>[15]</sup>针对 Helmholtz 喷嘴结构,分析来流流速和脉动压力对喷嘴出口流道空化效应的影响,提出用来流雷诺数和脉动特征值表征喷嘴出口流道的空化程度,本研究选用 Helmholtz 喷嘴与坝型结构喷嘴进行空化效果的对比。

图 6 为 Helmholtz 喷嘴腔室二维示意图,其中, $D_3$ 、 $D_4$  分别为上、下流道直径,分别取 8 和 15 mm; $B_3$ 、 $B_4$  分别为上、下流道长度,均取 30 mm;喷嘴腔径  $D=100$  mm;腔室长  $L_1=60$  mm;腔室夹角 $\theta_1=60^\circ$ 。

根据图 2、图 6 给定的坝型结构喷嘴和 Helmholtz 喷嘴进行数值模拟,得出液相体积分数云图(图 7)和喷嘴出口压力云图(图 8)。由图 7、图 8 可以看出,坝型结构喷嘴的空化效果优于 Helmholtz 喷嘴,而且在出口处更易形成均匀的负压区域。

在出口横截面沿直径方向均匀选取如图 9 所示的 22 个监测点,得到的各测点的速度及出口横截面上的速度分布(图 10 所示)。从图 10 可以看出,坝型结构喷嘴出口处的速度比 Helmholtz 喷嘴高。



图 5 Helmholtz 喷嘴腔室模型

Fig. 5 Helmholtz nozzle chamber model

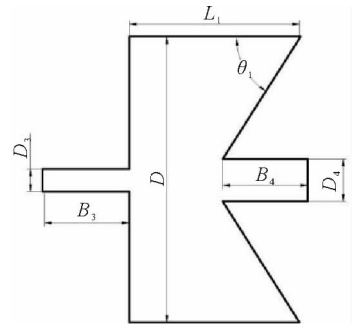


图 6 二维示意图

Fig. 6 2D schematic diagram

### 2.2 坝型结构喷嘴参数对空化效果的影响

鉴于坝型结构喷嘴比 Helmholtz 喷嘴具有更好的空化效果,进一步分析坝型喷嘴结构参数对空化效果的影响。

#### 2.2.1 上下流道直径比对空化效果的影响

根据传统喷嘴的尺寸参数设计,图 2 给定的坝型结构喷嘴改变下流道直径为 12 和 17 mm,使上下流道直径比由 0.53 变为 0.67 和 0.47,数值模拟得到 3 种不同流道直径比对应的液相体积分数、出口速度和出口压力分布云图分别如图 11~13 所示。由图 11 看出,直径比为 0.53 时,坝型结构喷嘴空化强度最好;由图 12~13 可知,直径比为 0.53 出口流速最大,出口负压分布更加均匀,所以直径比为 0.53 时坝型结构喷嘴的空化效果最为理想。

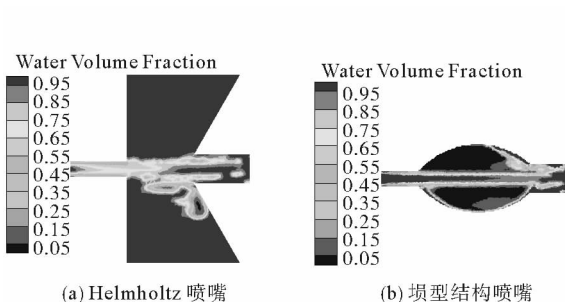


图 7 液相体积分数云图

Fig. 7 Contours of volume fraction of liquid phase

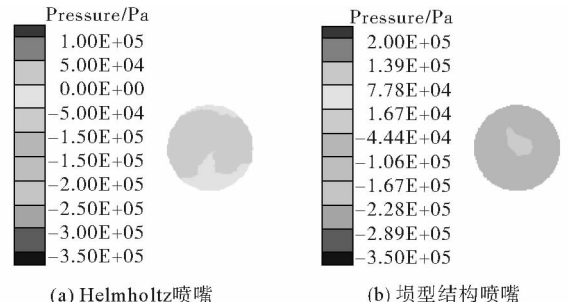


图 8 喷嘴出口压力云图

Fig. 8 Contours of pressure at nozzle exit

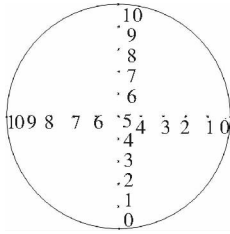


图 9 出口横截面上监测点的布置

Fig. 9 Arrangement of monitoring points in the cross section at the exit

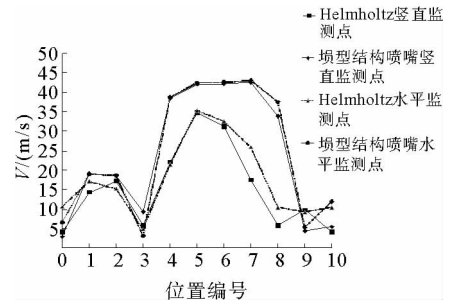


图 10 喷嘴出口速度分布

Fig. 10 Velocity profile at nozzle exit

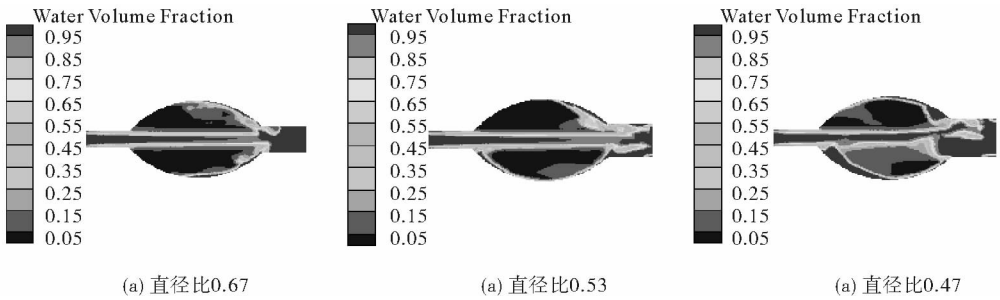


图 11 液相体积分数云图

Fig. 11 Contours of volume fraction of liquid phase

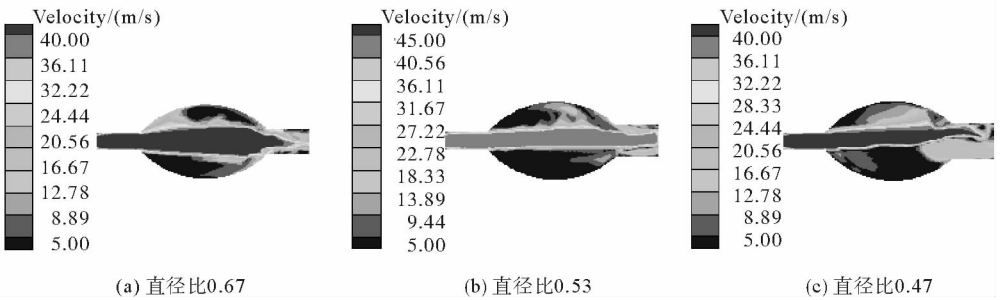


图 12 喷嘴速度云图

Fig. 12 Contours of velocity at nozzle

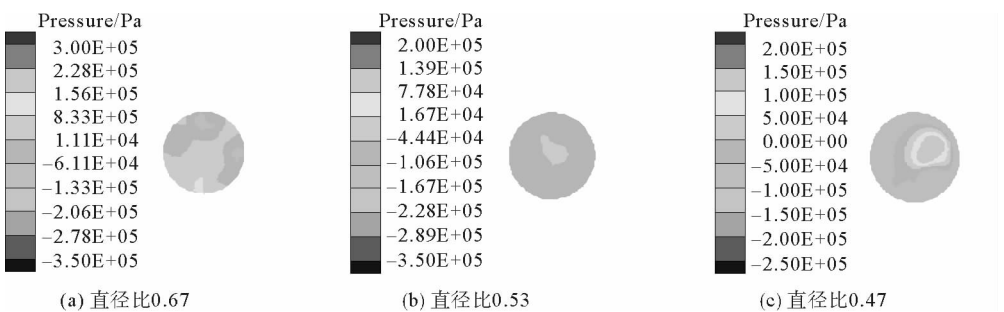


图 13 喷嘴出口压力云图

Fig. 13 Contours of pressure at the nozzle exit

### 2.2.2 坝型结构喷嘴弧线角度对空化效果的影响

基于图 2 中的坝型结构喷嘴,选取直径比为 0.53 的坝型结构喷嘴,并改变弧线角度为  $50^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $110^\circ$  进行数值模拟,分析喷嘴弧形角度对空化效果的影响。图 14 所示为 4 种坝型结构喷嘴的出口压力分布云图,由图 14 可知, $\theta=50^\circ$  时出口处负压分布更加均匀。图 15~16 所示为出口横截面沿直径方向各监测点的速度分布,可以看出, $\theta=50^\circ$  时出口速度呈现对称分布,说明  $\theta=50^\circ$  时出口流速均匀性更好。同时由图 17 可知当  $\theta=50^\circ$  喷嘴腔室内空化分布最为均匀,空化效果最佳。

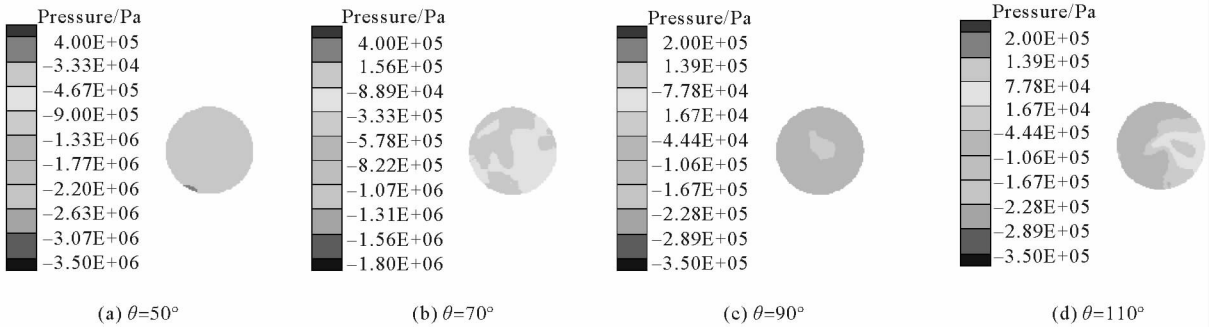


图 14 喷嘴出口压力云图

Fig. 14 Contours of pressure at nozzle exit

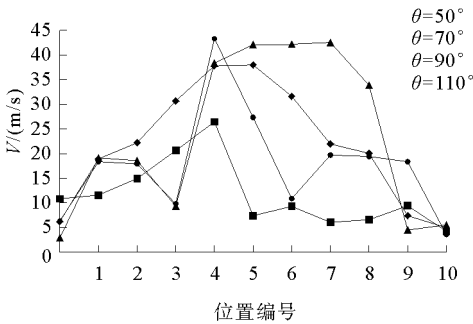


图 15 喷嘴出口速度竖直分布

Fig. 15 Vertical velocity profile at nozzle exit

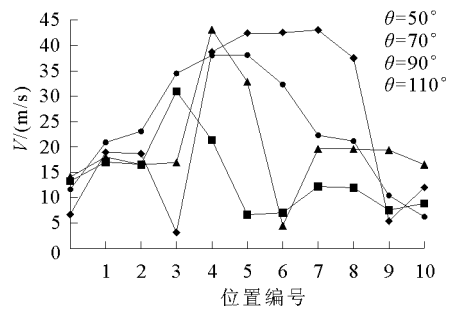


图 16 喷嘴出口速度水平分布

Fig. 16 Level velocity profile at nozzle exit

## 3 结论

通过坝型结构喷嘴与 Helmholtz 喷嘴的数值模拟对比及改变坝型结构喷嘴上下流道直径比和弧线角度,得到以下主要结论。

1) 在振荡时间为 100 ms 内,坝型结构喷嘴在 0~20 ms 时在喷嘴结构收缩处开始产生空化,液态水相开始减少,随着时间的推移,水流与喷嘴壁面碰撞形成回流,随着回流空化不断发展,在 60~80 ms 时坝型结构喷嘴的出口处开始发生空化,最终空化现象整体上近似对称分布。

2) 在上下流道直径相同的情况下,坝型结构喷嘴的出口速度比 Helmholtz 喷嘴高,出口更易形成均匀负压区域。说明坝型结构喷嘴比 Helmholtz 喷嘴的空化效果更好。

3) 对喷嘴上下流道直径比分别为 0.47、0.53、0.67 的 3 种坝型结构喷嘴射流的空化效果进行数值模拟,发现当直径比在 0.5~0.6 时,空化效果最佳。

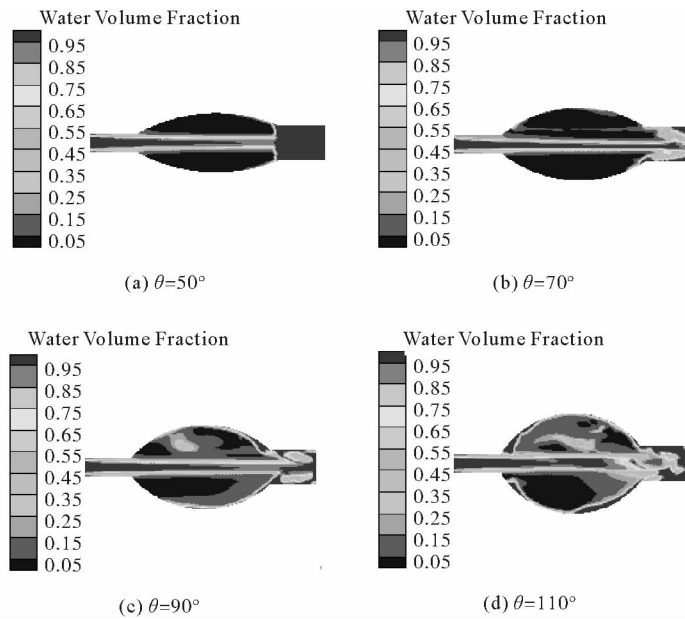


图 17 液相体积分数云图

Fig. 17 Contours of volume fraction of liquid phase

4) 当直径比为 0.53 时,分别取弧线角度  $\theta=50^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $110^\circ$  的坝型结构喷嘴射流进行空化效果的数值模拟,发现  $\theta=50^\circ$  时出口速度均匀性最好,同时出口处负压分布更加均匀,腔室内空化呈现对称分布,空化效果也最佳。

#### 参考文献:

- [1] KNAPP R T, DALLY J W, HAMMIT F G. Cavitation[M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [2] ALEHOSSEIN H, QIN Z. Numerical analysis of Rayleigh-pleeset equation for cavitation water jets[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 72(9): 780-807.
- [3] CHEN H S, LI J, CHEN D, et al. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water [J]. Wear, 2008, 265(5/6): 692-698.
- [4] 李江云, 王乐勤, 徐如良, 等. 低压大直径喷嘴自激脉冲射流空化模型[J]. 工程热物理学报, 2005, 23(3): 438-440.  
LI Jianguyun, WANG Yueqin, XU Ruliang, et al. Cavitation model for the low-pressure large-diameter self-excited pulse nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 23(3): 438-440.
- [5] WANG G, ZHANG S, YU M, et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries[J]. Applied Ocean Research, 2014, 46: 40-53.
- [6] 李根生, 沈忠厚, 张召平, 等. 自振空化射流钻头喷嘴研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 11-13.  
LI Gensheng, SHEN Zhonghou, ZHANG Zhaoping, et al. Development and field tests of self-resonating cavitating water jet nozzle for oilwell drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 11-13.
- [7] JOHONSON V E. The development of structured cavitating jet for deep hole bits[R]. SPE11060, 1982.
- [8] 汪志明, 沈忠厚. 自激振荡结构射流喷管内水声学特性研究[J]. 石油大学学报, 1994, 18(1): 24-29.  
WANG Zhiming, SHEN Zhonghou. On hydroacoustic characteristics of self-excited and structured jet pipe[J]. Journal of the University of Petroleum China, 1994, 18(1): 24-29.
- [9] 唐川林, 胡东, 裴江红. 自激振荡脉冲射流喷嘴频率特性实验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 122-125.  
TANG Chuanlin, HU Dong, PEI Jianghong. Experimental study on the frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed nozzle[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 122-125.



- [10] AKIRA S, SHIGEO H, AKIO T. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(17/18): 3575-3582.
- [11] 刘建军, 仇性启, 田孝帅, 等. 不同环境条件下轻油燃烧器火焰结构特性数值分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 80-87.
- LIU Jianjun, QIU Xingqi, TIAN Xiaoshuai, et al. Numerical analysis of the flame structural characteristics of light oil burner under different environmental conditions[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(2): 80-87.
- [12] 聂文, 彭慧天, 刘阳昊, 等. 风流影响雾滴与尘粒耦合沉降的实验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 30-36.
- NIE Wen, PENG Huitian, LIU Yanghao, et al. Experimental research on the coupling and settlement of droplets and dust particles influenced by airflow[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(6): 30-36.
- [13] ZWART P J, GODIN P Q, PENROSE J, et al. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]// Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, 2004: 1-11.
- [14] 汪朝晖, 胡亚男, 饶长健, 等. 自激振荡脉冲喷嘴空化效应及其射流形态的数值分析[J]. 机械工程学报, 2017, 28(13): 1535-1541.
- WANG Chaohui, HU Yanan, RAO Changjian, et al. Numerical analysis of cavitation effects of self-excited oscillation pulse nozzle and jet forms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 28(13): 1535-1541.
- [15] 汪朝晖, 胡亚男, 廖振方, 等. 基于自激振荡脉冲效应的雾化喷嘴出口流道空化特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 204-212.
- WANG Chaohui, HU Yanan, LIAO Zhenfang, et al. Cavitation characteristic study on the outlet channel of atomization nozzle based on the self-excited oscillating pulse effects[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 204-212.

(责任编辑:高丽华)